

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE SISTEMAS DE TELEVISIÓN DIGITAL VÍA SATÉLITE

Una herramienta fundamental a la hora del diseño de un sistema de comunicaciones por satélite es el cálculo de enlace. Este término se refiere al proceso matemático para calcular los niveles de señal de un canal satelital tomando en cuenta los niveles de potencia, amplificadores, diferentes factores de atenuación, entre otros parámetros.

El objetivo de un cálculo de enlace es obtener los niveles de potencia necesarios para que nuestro enlace satelital pueda efectuarse correctamente. Para ello intervienen diferentes factores físicos, aquellos procesos aplicados a la señal tanto en las estaciones terrenas como en el satélite, así como la ubicación geográfica de las estaciones.

Un enlace satelital para su estudio se puede dividir en tres partes:

- Enlace ascendente (*Uplink*): Hace referencia a la señal cuyo transmisor corresponde a la estación terrena E/T y el receptor al satélite.
- Enlace descendente (*Downlink*): Se refiere a la señal cuyo transmisor es el satélite y el receptor la estación terrena E/T.
- Evaluación total del enlace: Esta parte consiste en determinar la calidad del enlace tomando en cuenta las dos partes anteriores.

La figura 3.1 muestra los elementos de análisis principales que intervienen en un enlace satelital. Cada parte del sistema de comunicaciones aporta ciertos parámetros al cálculo de enlace.

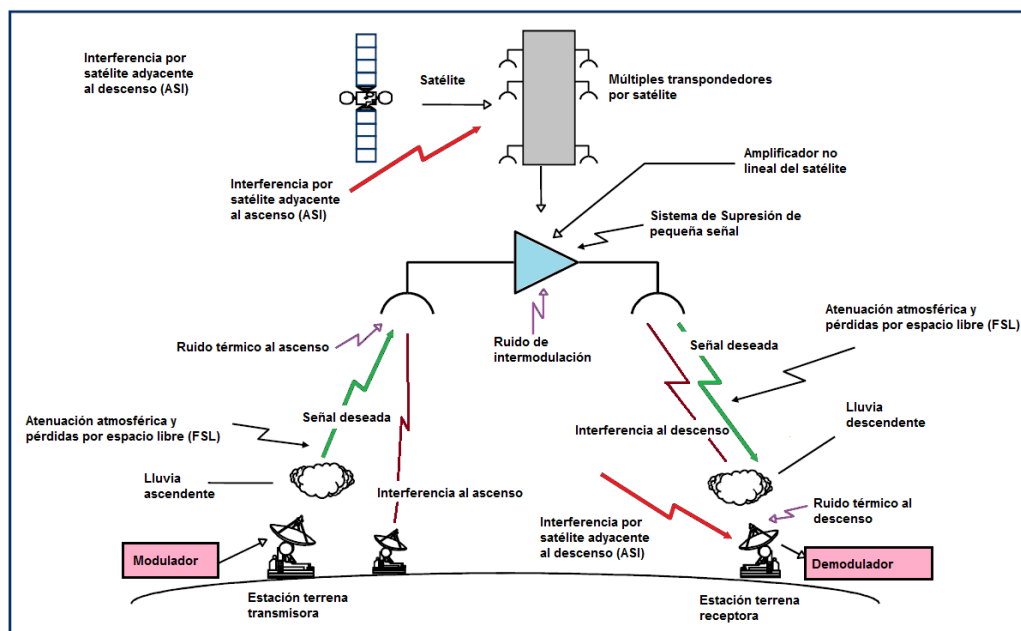


Figura 3.1.: Elementos de análisis para un enlace satelital.

En cuanto a la E/T transmisora los parámetros de importancia son:

- Velocidad de Información, índice de modulación, factor de corrección de errores y *Roll-Off* de la señal a transmitir.
- La potencia nominal de transmisión y Back-off del HPA (*High Power Amplifier*).
- La ganancia proporcionada por la antena.

En cuanto satélite los parámetros empleados en el cálculo de enlace son:

- La Densidad de Flujo de Saturación (DFS), Figura de Mérito del satélite (G/T), PIRE de saturación, entre otros.

Por último en la E/T receptora:

- La ganancia de recepción de la antena.
- La temperatura de ruido que se obtiene del sistema incluyendo el LNA (*Low Noise Amplifier*).
- Valor de E_b/N_0 necesario para la correcta recepción.

Uno de los factores que siempre estará presente en las comunicaciones de RF es la degradación de la señal o atenuación. Por lo anterior en los diferentes métodos de cálculo de enlace siempre interviene una relación entre la señal o portadora y el ruido. El método que se explicará en este documento es el de “Relación de portadora a Ruido” C/N.

Las pérdidas que generalmente se toman en cuenta son:

- Pérdidas por espacio libre. Este parámetro va enfocado a la propagación de la señal en un medio sin pérdidas que en la UIT-R se define como un medio dieléctrico, homogéneo e isótropo infinito en todas las direcciones. Por obvias razones este medio es ideal, pero este modelo permite conocer las pérdidas de propagación debidas solamente a la distancia del radioenlace.
- La atenuación atmosférica. Este tipo de atenuación es muy importante para las comunicaciones satelitales debido a que dependiendo de la frecuencia de la señal, la señal se verá afectada en diferentes medidas por la lluvia y otros elementos que componen la atmósfera como oxígeno y vapor de agua.
- Otras pérdidas misceláneas como las pérdidas por conexiones, apuntamiento y polarización, entre otros fenómenos.

3.1. Método para el cálculo de enlace.

El cálculo de enlace se dividirá esencialmente en tres partes [27]. El cálculo de la relación portadora a ruido ascendente (C/N_{asc}), el cálculo de la relación portadora a ruido descendente (C/N_{desc}) y la relación portadora a ruido total (C/N_{total}).

Una vez obtenido este valor se realiza la evaluación del enlace, el cual se puede realizar determinado el margen de enlace. Este parámetro indica la calidad total del enlace, tomando en cuenta la calidad o C/N esperada o requerida y el valor de C/N_{total} .

3.1.1 Enlace ascendente.

La ecuación que se muestra a continuación considera los factores principales o de mayor importancia para el enlace satelital.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{asc} = PIRE_{E/T} + \left(\frac{G}{T}\right)_{SAT} - K - LS_{asc} - \mu_{asc} - L\Delta_{asc} [dB]$$

$PIRE_{E/T}$.

Este valor corresponde a la de potencia isotrópica radiada efectiva de la E/T y se puede calcular como el producto de la potencia de transmisión P_{tx} y la Ganancia de transmisión G_{tx} .

$$PIRE_{E/T} = 10 \cdot \text{Log}(P_{tx}) + G_{tx}$$

G/T_{SAT} .

Se refiere a la figura de mérito o factor de calidad del satélite. Es un valor especificado en cada satélite.

K

Es la constante de Boltzman cuyo valor corresponde aproximadamente a -228 (dB/K)

LS_{asc}

Se refiere a las pérdidas en el espacio libre ascendentes. Este valor corresponde a las pérdidas de potencia más grandes de un enlace satelital debido a las enormes distancias que recorre el enlace.

$$LS_{asc} = 20 \text{Log}\left(\frac{4\pi \cdot f_{asc} \cdot D}{C}\right)$$

Dónde: f = frecuencia ascendente en Hz.

D= distancia entre la E/T y el satélite.

C= velocidad de la luz.

La distancia entre la E/T y el satélite también es conocida como Rango satelital.

μ_{asc}

Corresponde a las pérdidas por lluvia o margen de atenuación por lluvia ascendente. Este parámetro está completamente comprometido con la zona geográfica de la E/T terrena. Este fenómeno atmosférico, como ya se comentó, representa un problema para las comunicaciones satelitales y ha sido objeto de estudio durante casi medio siglo.

Existen varios modelos matemáticos para el cálculo de este valor como el realizado por Crane, el de la UIT-R, etc. El modelo ocupado por laUIT es un modelo empírico, se basa en obtener curvas que coincidan o se asemejen a las gráficas obtenidas con los datos previamente medidos. Por ello, un factor importante para obtener datos exactos es tener datos estadísticos suficientes.

$L\Delta_{asc}$

Este valor corresponde a las pérdidas misceláneas alusivas a efectos atmosféricos, pérdidas por apuntamiento y por polarización. Su valor aproximado es de 1dB.

Una vez obtenido el valor de C/N_{0asc} se obtiene el valor de C/N_{asc} con la siguiente relación:

$$(C/N)_{asc} = (C/N_0)_{asc} - 10 \log (AB)$$

En donde AB corresponde al ancho de banda del enlace y se obtiene por medio de diferentes factores dependiendo del tipo de información transportada.

Una vez evaluado el valor de C/N_{asc} es necesario considerar otras relaciones de portadora a ruido existentes en la realidad. Se toman en cuenta el ruido de intermodulación, el ruido producido por las señales de polarización cruzada y el ruido debido a la inducción de señales debido a satélites adyacentes. Promediadas todas las relaciones se obtiene la relación de portadora a ruido ascendente total C/N_{ascT} que se usará en la evaluación del enlace final.

$$\left(\frac{C}{N} \right)_{ASCTOTAL} = 10 \log \left[\frac{1}{\frac{1}{10^{(C/N_{asc}/10)}} + \frac{1}{10^{(C/I_{asc}/10)}} + \frac{1}{10^{(C/X_{polAsc}/10)}} + \frac{1}{10^{(C/X_{satAdyAsc}/10)}}} \right]$$

3.1.2 Enlace Descendente

Siguiendo un proceso similar, es necesario realizar un balance de pérdidas y ganancias para obtener una relación portadora a ruido en el enlace del satélite a la terminal receptora. La siguiente ecuación representa los principales factores tomados cuenta para el cálculo de esta relación.

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{desc} = PIRE_{SAT} + (G/T)_{E/T} - K - Ls_{desc} - \mu_{desc} - L\Delta_{desc} [dB]$$

PIRE SAT.

Este valor corresponde a la de potencia isotrópica radiada efectiva del satélite hacia un punto de la Tierra. Se requiere realizar un balance de la señal recibida por el satélite y las diferentes etapas de amplificación y pérdidas dentro del satélite.

G/TE/T.

Se refiere a la figura de mérito de la estación terrena del satélite. Este valor se calcula mediante la siguiente expresión:

$$(G/T)_{E/T} = G_{RX} - 10 \log(T_s)$$

Siendo: GRX = Ganancia de la antena receptora.

Ts= Temperatura de ruido total del sistema receptor.

K

Es la constante de Boltzman cuyo valor corresponde a -228 (dB/K)

LS_{desc}

Se refiere a las pérdidas en el espacio libre descendentes. Este valor es menor al caso del enlace de subida debido a que por lo general la frecuencia de transmisión es menor. Se calcula mediante la expresión:

$$Ls_{desc} = 20 \log \left(\frac{4\pi \cdot f_{desc} \cdot D}{C} \right)$$

μ_{desc}

Corresponde a las pérdidas por lluvia o margen de atenuación por lluvia descendente. Al existir una relación de proporcionalidad con la frecuencia, también son menores las pérdidas para este caso comparando con el enlace ascendente.

$L\Delta_{desc}$

Este valor corresponde a las pérdidas misceláneas que conllevan las pérdidas atmosféricas, por apuntamiento y por polarización. Su valor aproximado es de 1dB

Una vez realizado el balance, la relación portadora ruido en el enlace descendente se obtiene mediante la expresión:

$$(C/N)_{desc} = (C/N_0)_{desc} - 10 \text{ Log } (AB)$$

Una vez evaluado el valor de C/N_{desc} es necesario considerar otras relaciones de portadora a ruido existentes en la realidad. Se toman en cuenta el ruido de intermodulación, el ruido producido por las señales de la polarización cruzada y el ruido debido a la inducción de señales debido a satélites adyacentes pero esta vez en el enlace de bajada. Promediadas todas las relaciones se obtiene la relación de portadora a ruido descendente total C/N_{descT} que se usará en la evaluación del enlace final.

$$(C/N)_{DESCTOTAL} = 10 \log \left[\frac{1}{\frac{1}{10^{(C/N_{desc}/10)}} + \frac{1}{10^{(C/I_{desc}/10)}} + \frac{1}{10^{(C/X_{polDesc}/10)}} + \frac{1}{10^{(C/X_{satAdyDesc}/10)}}} \right]$$

3.1.3 Evaluación del Enlace

En este punto se calcula la relación C/N_{TOTAL} resultante de la combinación entre el enlace ascendente total y el enlace descendente total. Además, se calcula la relación $C/N_{REQUERIDA}$ que depende de las características del módem y de la señal. Al comparar a la C/N_{TOTAL} con la $C/N_{REQUERIDA}$, obtenemos el valor del Margen del enlace que nos indicará finalmente si nuestro enlace cumple o no con la calidad deseada en el diseño y es factible su implementación. La C/N_{TOTAL} se calcula mediante la siguiente expresión:

$$(C/N)_{TOTAL} = 10 \log \left[\frac{1}{\frac{1}{10^{(C/N_{ASCOTAL}/10)}} + \frac{1}{10^{(C/N_{DESCOTAL}/10)}}} \right]$$

La relación portadora a ruido requerida para que el enlace sea factible se calcula mediante la siguiente expresión:

$$(C/N)_{REQ} = E_b / N_0 + 10 \text{ Log } (V_{inf}) - 10 \text{ Log } (AB)$$

Finalmente, el margen que nos permite conocer si nuestro enlace funcionará se obtiene con la siguiente fórmula:

$$ME = (C/N)_{TOTAL} - (C/N)_{REQ}$$

Si el margen del enlace es mayor o igual a 0dB se considera que el enlace tiene las condiciones técnicas para operar. Sin embargo, como se observó en este procedimiento, existen muchos factores variables en el balance, por lo que los valores óptimos son aquellos en los que se consideren los peores casos como, por ejemplo el caso de que esté lloviendo en la localidad del sitio transmisor y el receptor al mismo tiempo.

Por otro lado, hay que considerar un porcentaje de operatividad o disponibilidad del enlace bajo estas condiciones, pues existen limitaciones económicas, técnicas y naturales que impiden que ésta sea del 100%. Los porcentajes de disponibilidad recomendados por la UIT deben de ser mayores al 99.5%, pero esto depende del tipo de información que se transmita.

3.2. Cálculo de pérdidas por propagación.

Las pérdidas de propagación en un trayecto Tierra-espacio con relación a las pérdidas en el espacio libre, son la suma de distintas aportaciones como [37]:

- atenuación debida a los gases atmosféricos;
- atenuación debida a la lluvia, a otras precipitaciones y a las nubes;
- apuntamiento y desapuntamiento;
- disminución de la ganancia de antena debida a la incoherencia del frente de onda;
- centelleo y efectos debidos a la propagación por multitrayectorias;
- atenuación debida a las tormentas de arena y polvo.

Cada una de estas aportaciones tiene sus propias características en función de la frecuencia, la ubicación geográfica y el ángulo de elevación.

En general, para ángulos de elevación por encima de 10°, únicamente la atenuación gaseosa, la atenuación debida a la lluvia y las nubes y posiblemente el centelleo tendrá importancia, dependiendo de las condiciones de propagación.

La atenuación debida a los gases atmosféricos, que es enteramente causada por la absorción, depende principalmente de la frecuencia, del ángulo de elevación, de la altura sobre el nivel del mar y de la densidad de vapor de agua (humedad absoluta). A frecuencias por debajo de 10 GHz, normalmente puede ignorarse. Su importancia aumenta con la frecuencia por encima de 10 GHz, especialmente para ángulos de elevación bajos. En el caso de la banda Ku la atenuación máxima es de alrededor de 0.02dB/Km. Para banda Ka el valor máximo se incrementa a 0.1dB/Km. Normalmente, la máxima atenuación gaseosa se produce en la estación de mayores lluvias.

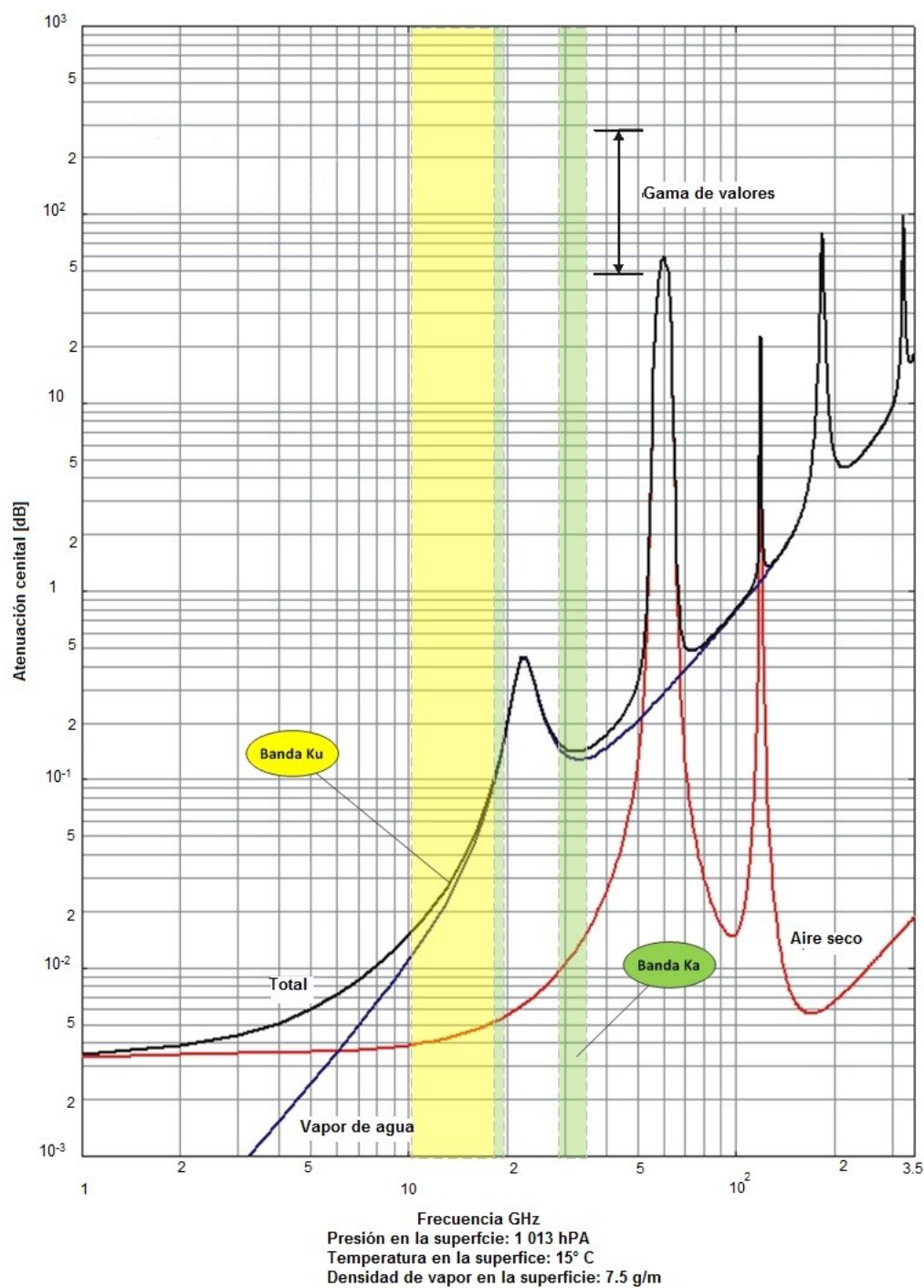


Figura 3.2. Atenuación cenital vs. frecuencia.

Como podemos ver en la figura 3.2 en la banda Ka se incrementan algunos fenómenos de atenuación de las ondas electromagnéticas con respecto a otras de menor frecuencia. La atenuación por lluvia es mayor que en el caso de un enlace en banda Ku. Esto conlleva a que los

sistemas necesitan un cálculo y predicción más preciso con la finalidad de hacerlos más eficientes tanto en funcionamiento como en costo.

El uso de la banda Ka de frecuencias implica que se tengan que entender nuevos problemas y retos: los fenómenos de propagación afectan más fuerte a las señales que son transmitidas y es necesario el desarrollo de nueva tecnología. Por otra parte, para garantizar la alta capacidad y disponibilidad de los enlaces de transmisión, es necesario utilizar modulaciones y codificaciones adaptivas.

Suponiendo un diseño de sistemas de satélites convencionales, la PIRE se determina teniendo en cuenta los requisitos del margen del enlace para alcanzar los objetivos de disponibilidad. La PIRE necesaria podría ser demasiado grande para que el sistema de satélites fuera factible.

Dadas las condiciones de propagación, puede que sea necesario aplicar las adecuadas técnicas de reducción de la atenuación debida a la lluvia para poner en funcionamiento sistemas factibles en las bandas de frecuencias más elevadas.

En base a experimentos con el satélite ACTS (Advanced Communication Technology Satellite) y los resultados arrojados por estos, fue posible la comparación de varios modelos teóricos de cálculo de la atenuación. El resultado del estudio comparativo de estos modelos mostró que el método descrito por la UIT en la recomendación UIT-R 618-5 de 1997 no arrojaba predicciones aceptables.

El modelo de cálculo de atenuación que tuvo mejores aproximaciones a los experimentos del ACTS fue una variante extendida del método UIT-R, el modelo DAH (Dissanyake, Allnutt, Haidaral). Actualmente, y desde 1999, la recomendación UIT-R 618-10 (aprobada en 2009) ya toma en cuenta las consideraciones del modelo DAH [21].

El método que se desarrolla a continuación proporciona estimaciones a largo plazo de las estadísticas que facilitan el cálculo de la atenuación debida a la lluvia sobre un determinado punto para frecuencias de hasta 55 GHz.

Se precisan conocer los parámetros siguientes, algunos de ellos se muestran en la figura 3.3:

- $R_{0.01}$: Intensidad de la lluvia en el punto de que se trate, para el 0,01% de un año medio (mm/h)
- h_s : Altura de la estación terrena sobre el nivel medio del mar (km)
- θ : Ángulo de elevación (grados)
- ϕ : Latitud de la estación terrena (grados)
- f : Frecuencia (GHz)
- R_e : Radio efectivo de la Tierra (8 500 km)

Si no se dispone de datos locales de la altura de la estación terrena sobre el nivel medio del mar, se puede obtener una estimación a partir de los mapas de altitud topográfica de la UIT.

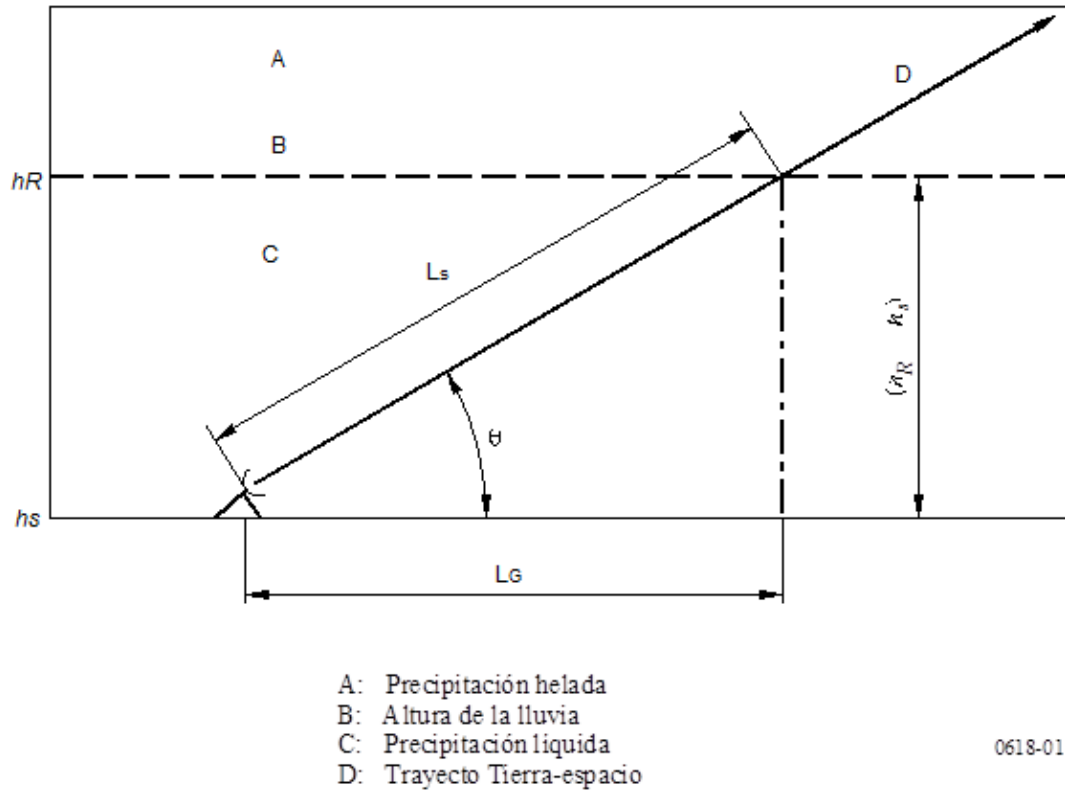


Figura 3.3. Representación esquemática de un trayecto Tierra-espacio.

Paso 1: Se determina la altura de la lluvia, h_R , indicada en la Recomendación UIT-R P.839-3 [39]. Para obtener este valor se utiliza un archivo de datos (proporcionado por la UIT) con los datos de la altura isoterma de 0°C por encima del nivel del mar (h_0) y se aplica la siguiente expresión:

$$h_R = h_0 + 0.36 \text{ km}$$

Paso 2: Para $\theta \geq 5^\circ$, se calcula la longitud del trayecto transversal u oblicuo, L_s , en el espacio correspondiente a la altura de la lluvia mediante la fórmula:

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \quad \text{km}$$

Para $\theta < 5^\circ$ se utiliza la fórmula siguiente:

$$L_s = \frac{2(h_R - h_s)}{\left(\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e} \right)^{1/2} + \sin \theta} \quad \text{km}$$

Si $h_R - h_s$ es menor o igual a cero, la atenuación debida a la lluvia prevista para cualquier porcentaje de tiempo es cero y no son necesarios los pasos siguientes.

Paso 3: Se determina la proyección horizontal, L_G , de la longitud del trayecto oblicuo aplicando la siguiente ecuación:

$$L_G = L_s \cos \theta \quad \text{km}$$

Paso 4: Se obtiene la intensidad de la lluvia, $R_{0.01}$, rebasada durante el 0.01% de un año medio (con un tiempo de integración de 1 min). Si no pueden obtenerse datos estadísticos a largo plazo a partir de fuentes locales de información, puede hacerse una estimación utilizando los mapas de intensidad de lluvia que aparecen en la Recomendación UIT-R P.837-5 [38]. Si $R_{0.01}$ es cero, la atenuación debida a la lluvia prevista para cualquier porcentaje de tiempo es cero y no son necesarios los pasos siguientes.

Paso 5: Se halla la atenuación específica, γ_R , utilizando los coeficientes dependientes de la frecuencia y polarización (k, α) que aparecen en la Recomendación UIT-R P.838-3 [66] y el índice de intensidad de la lluvia, $R_{0.01}$, determinado según el Paso 4, aplicando la ecuación:

$$\gamma_R = k (R_{0.01})^\alpha \quad \text{dB / km}$$

Los valores de los coeficientes k y α se determinan en función de la frecuencia, f (GHz), en la gama de 1 a 1 000 GHz, a partir de ecuaciones y tablas definidas en la recomendación.

Paso 6: Se calcula el factor de reducción horizontal, $r_{0.01}$, para el 0.01% del tiempo:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38 (1 - e^{-2L_G})}$$

Paso 7: Se calcula el factor de ajuste vertical, $v_{0.01}$, para 0.01% del tiempo:

$$\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_s}{L_G r_{0.01}} \right) \quad \text{grados}$$

Para $\zeta > \theta$,

$$L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} \quad \text{km}$$

De otro modo,

$$L_R = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \quad \text{km}$$

Si $|\varphi| < 36^\circ$, $\chi = 36 - |\varphi|$ grados

De otro modo, $\chi = 0$ grados

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left(31 \left(1 - e^{-(\theta/(1+\chi))} \right) \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0.45 \right)}$$

Paso 8: La longitud de trayecto efectiva es:

$$L_E = L_R v_{0.01} \quad \text{km}$$

Paso 9: La atenuación de rebasamiento prevista para el 0.01% de un año medio $A_{0.01}$ se obtiene mediante:

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \quad \text{dB}$$

Paso 10: La atenuación de rebasamiento estimada para otros porcentajes de un año medio, en el margen del 0.001% al 5%, se determina a partir de la atenuación de rebasamiento para el 0.01% de un año medio:

Si $p \geq 1\%$ ó $|\varphi| \geq 36^\circ$: $\beta = 0$

Si $p < 1\%$ y $|\varphi| < 36^\circ$ y $\theta \geq 25^\circ$: $\beta = -0.005(|\varphi| - 36)$

De otro modo: $\beta = -0.005(|\varphi| - 36) + 1.8 - 4.25 \sin \theta$

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-(0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-p) \sin \theta)} \quad \text{dB}$$

Hay que tener en cuenta la importante variación anual que registran las estadísticas de intensidad de lluvia. El valor obtenido de atenuación por lluvia se obtiene tanto para el enlace ascendente como para el descendente.

3.3 Análisis de la eficiencia de los estándares de transmisión de TV por satélite.

Existen diversas formas para comparar la eficiencia de un sistema de comunicaciones por satélite. En el caso de la transmisión de video por satélite existen diversos parámetros importantes:

- Tasa de datos binaria. Es la cantidad máxima de datos que se puede transmitir por el canal limitado en ancho de banda. Mientras esta tasa sea mayor, es evidente que se pueden transmitir más información. Esto repercute en mejoras en la calidad del audio y el video.
- Ancho de banda disponible: Al ser los satélites canales limitados en ancho de banda, es necesario tomar en cuenta la disponibilidad de este. Si se dispone de un transpondedor completo para la transmisión de la información, se aprovecha el máximo la potencia disponible. En cambio, si el transpondedor es compartido con otros servicios, es necesario balancear la potencia y ancho de banda entre todas las portadoras.
- E_b/N_0 : Parámetro que nos permite comparar si la señal recibida tiene la suficiente calidad para ser decodificada en el receptor de acuerdo a las características acordadas en el estándar de transmisión. Con un E_b/N_0 mayor al de umbral, se tiene un margen que asegura la correcta transmisión de los datos con una cantidad de errores aceptable.
- C/N: Similar al E_b/N_0 , es posible obtener el umbral en el que se asegura que la potencia de la portadora es suficiente para lograr establecer el enlace.

En base a estos parámetros, podemos establecer dos categorías para evaluar la eficiencia de los estándares de transmisión:

1. Umbrales requeridos para transmitir la señal de TV (Depende de la codificación de fuente).
2. Margen del enlace de la señal (Referente al cálculo de los niveles necesarios para que el enlace se lleve a cabo)

Con el método de cálculo de enlace actual, se pueden cuantificar los fenómenos que afectan a la propagación mediante modelos de la UIT a través de los cuales se obtiene la atenuación con un porcentaje de tiempo en el que se prevé que el sistema no opere.

Hoy, los nuevos sistemas de telecomunicaciones están migrando de servicios de distribución masivos como la radio y TV a servicios interactivos como el Internet, video bajo demanda, voz sobre IP, etc. En el caso de los estándares DVB, se manejó una solución complementaria que facilitara la interacción: el estándar DVB-RCS.

Para tener suficientes recursos de espectro radioeléctrico disponibles, el uso de la banda Ka tiene que ser considerado en servicios con canal de retorno (20GHz para el enlace e-T y 30GHz para el T-e). Para mantener una ganancia en la cobertura suficiente y debido al aumento de frecuencia, se usan haces puntuales reducidos. Por lo tanto, un sistema típico en banda Ka está compuesto por varios haces. De igual forma, han de tomarse en cuenta los inconvenientes que puedan tener las transmisiones que operen en la banda Ka debido a la reutilización de frecuencia y / o de la polarización:

- Señales interferentes de alta potencia pueden afectar los enlaces de transmisión dependiendo de la localización del usuario.
- La atenuación de la potencia debido a los fenómenos de propagación puede alcanzar decenas de decibeles.
- La diferencia de la ganancia de la antena entre el centro de la cobertura y la orilla de esta puede ser de varios decibeles.

Para optimizar la disponibilidad de los enlaces y los recursos de frecuencia dependiendo de la configuración se pueden utilizar técnicas adaptivas de modulación y/o codificación. Esta adaptividad consiste en hacer coincidir la tasa de datos con las fluctuaciones del canal a través de controles automáticos de potencia y datos de control en el enlace de retorno. En algunas ocasiones, el peor de los casos analizado en un cálculo de enlace tradicional no es suficiente. Por tanto, el comportamiento de una red debe ser estimado en toda la cobertura bajo un análisis matricial (figura 3.4) en que se pueden tener resultados tanto de disponibilidad y margen de enlace para una disponibilidad dada [53].

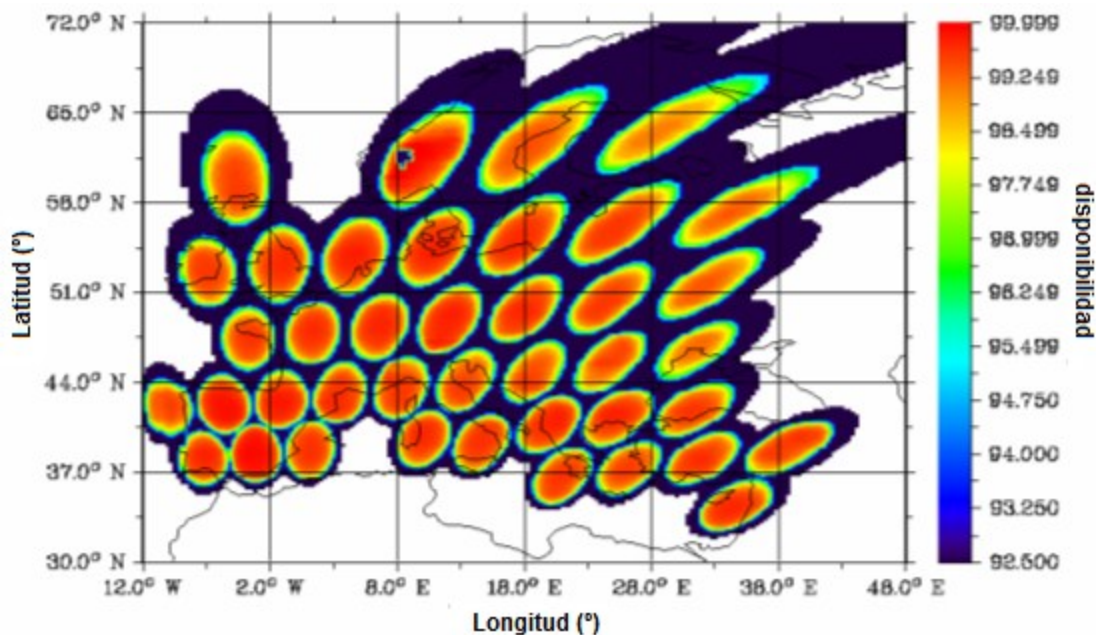


Figura 3.4. Disponibilidad de red DVB-S2 (8-PSK ¾) con cobertura en banda Ka.

Variando los parámetros de disponibilidad y las modulaciones se pueden obtener otro sin número de valores comparativos para esquemas y configuraciones específicas, logrando así tener un análisis de desempeño completo (figura 3.5).

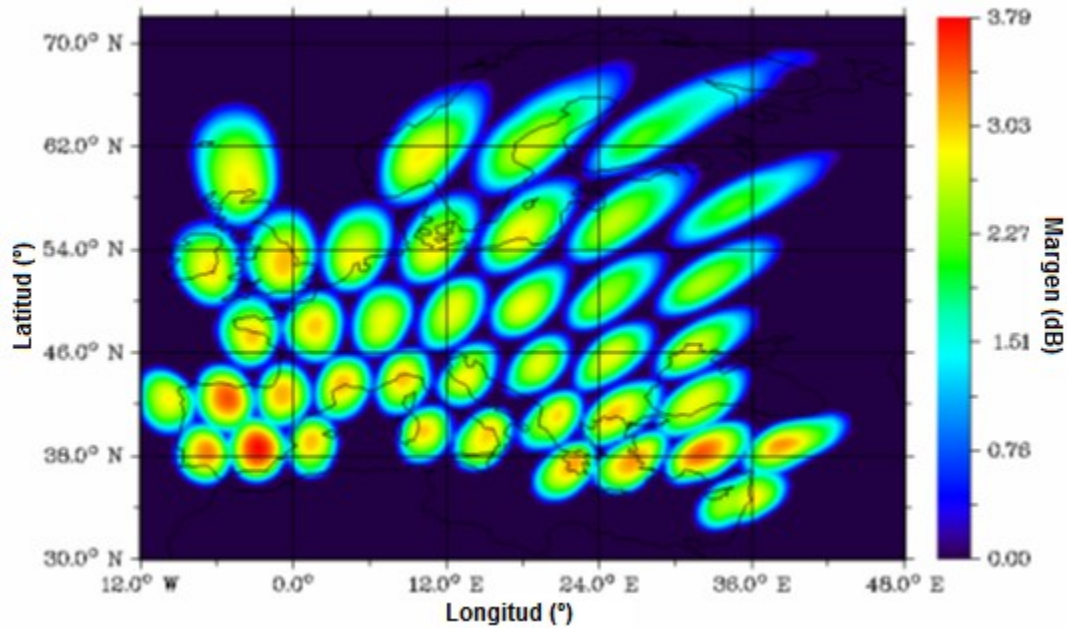


Figura 3.5. Margen de enlace de red DVB-S2 (8-PSK ¾) con disponibilidad del 99.0% en banda Ka.

En el enlace de retorno el problema de análisis difiere un poco. Contrario al enlace ascendente, en el de retorno los datos transmitidos no son transportados en una misma portadora (MF-TDMA). Asimismo, se depende de la cantidad de información transmitida, la ganancia de la antena, la carga del sistema, las condiciones de propagación, etc. Un nuevo análisis y correlación del enlace de retorno debe de ser hecho para caracterizar de la mejor manera todo el sistema de comunicaciones.

Para llevar a cabo este análisis, se debe de tomar en cuenta que los estándares para la transmisión de televisión digital por satélite presentados en este trabajo no son todos de características similares o se implementan en diferentes aplicaciones y regiones. De acuerdo a sus características y estado de uso, los estándares más convenientes para su análisis son:

- DVB-S/DVB-DSNG
- DVB-S2
- ISDB-S

3.3.1. Eficiencia de codificación y ancho de banda.

Dependiendo del estándar ocupado en la codificación de fuente (MPEG-2 o MPEG-4/AVC), el rendimiento de la codificación en el caso de MPEG-4 puede ir del 43 al 63%. Esto significa que se puede codificar aproximadamente el doble de información en MPEG-4/AVC comparado con un flujo de datos codificados en MPEG-2.

En la etapa de codificación de canal definida por los estándares de transmisión, el rendimiento máximo está cerca del 30% para el caso de DVB-S2 comparado con DVB-S. Con el fin de evaluar y demostrar estos resultados, es necesario conocer la forma en que codifican cada uno de los estándares y comparar estos requerimientos con las tablas de eficiencia de codificación que existen publicadas para cada sistema.

Ejemplo 1: Sistema DTH con transpondedores de 36MHz y modulación QPSK (Potencia limitada).

Fijando la tasa de símbolos y el factor de caída del filtro a un valor constante en un esquema QPSK, se puede determinar cuál de los estándares puede codificar mayor cantidad de información en el mismo ancho de banda, así como la potencia requerida para transportar dicha información.

Como condiciones de análisis, se establecieron los siguientes parámetros en todos los casos

- Información codificada en MPEG-2
- Tasa de símbolos: 26.667 MS/s
- Esquema de Modulación: QPSK
- FEC: 3/4
- Tasa de datos y de codificación constante para DVB-S2 e ISDB-S
- Roll-Off de 0.35

Resultados:

Estándar	Tasa neta de información (kbps)	Ancho de banda requerido en el satélite (MHz)	E_b/N_0 (dB) ³	C/N (dB)	Porcentaje de eficiencia en el volumen de información transmitida ⁴ (%)	Porcentaje de potencia requerida a la recepción ⁵ (%)
DVB-S /DVB-DSNG	36853.8	36.0	6.26	6.37	100%	100%
DVB-S2	38723.2	36.0	2.41	2.73	105.1%	43.3%
ISDB-S	36154.3	36.0	6.59	7.14	98.1%	119.4%

Figura 3.6. Tabla comparativa de información transmitida y potencia requerida (potencia limitada).

Tomando en cuenta los niveles de E_b/N_0 y C/N requeridos por cada enlace, la superioridad de la corrección de errores en el estándar DVB-S2 permite el consumo de menos potencia, logrando así un enlace con niveles de calidad buenos y ocupando menos recursos. Bajo estas condiciones, se observa en la tabla de la figura 3.6 que en total se requiere 2.3 veces menos potencia a la recepción. No obstante que el ahorro de potencia es importante, la eficiencia buscada se alcanza

³ Para DVB-S/DVB-DSNG/DVB-S2: BER: 1×10^{-7} ; para ISDB-S: BER: 1×10^{-11}

⁴ Cálculo comparativo entre el volumen de información transmitida bajo el esquema de un estándar en comparación con el volumen de información para el esquema codificado en DVB-S

⁵ Cálculo comparativo entre la potencia requerida bajo el esquema de un estándar en comparación con el nivel necesario para el esquema codificado en DVB-S

variando los parámetros de transmisión y adecuando estos niveles a los niveles que puede proporcionar el satélite.

Por otra parte, se observa que en el estándar ISDB-S los requerimientos de calidad son mayores y se requiere mayor potencia para tener una eficiencia similar a la del estándar DVB-S. Vale la pena mencionar que el estándar ISDB-S se aplica solamente en el territorio de Japón. Por tal motivo, los satélites utilizados para cubrir la geografía de las islas pueden contar, entre muchas otras ventajas, con coberturas regionales con altos niveles de ganancia y potencia radiada. Adicionalmente, es importante recordar que ISDB-S adopta técnicas de modulación variable en la implementación real. Con esto, la disponibilidad es alta y los datos se transmiten de manera fiable.

Ejemplo 2: Sistema DTH con transpondedores de 36MHz y parámetros ajustados a una relación C/N similar (AB limitado).

A fin de codificar la máxima cantidad de información y suponiendo que el requisito de la potencia es de menor interés en este caso, se pueden optar por algunos de los esquemas más robustos definidos para cada estándar.

- Información codificada en MPEG-2
- Tasa de símbolos DVB-S @ $\alpha=0.35$: 26.667 MS/s
- Tasa de símbolos DVB-S2 @ $\alpha=0.25$: 28.80 MS/s
- Tasa de símbolos ISDB-S @ $\alpha=0.35$: 26.667 MS/s
- Esquema DVB-S: QPSK 7/8
- Esquema DVB-S2: 8QPSK 5/6
- Esquema ISDB-S: QPSK 7/8
- Tasa de datos y de codificación constante para DVB-S2 e ISDB-S

Estándar	Tasa neta de información (kbps)	Ancho de banda requerido en el satélite (MHz)	Eb/No (dB)	C/N (dB)	Porcentaje de eficiencia en el volumen de información transmitida (%)	Porcentaje de potencia requerida a la recepción (%)
DVB-S	43013.3	36.0	7.53	8.31	100%	100%
DVB-S2	69762.2	36.0	5.51	8.38	162.2%	101.6%
ISDB-S	42179.4	36.0	7.26	8.48	98.1%	104.0%

Figura 3.7. Tabla comparativa de información transmitida y potencia requerida (AB limitado).

De la tabla de la figura 3.7 podemos obtener varios resultados:

- Si se ajusta el esquema de codificación de tal manera que se tenga un umbral de C/N similar en todos los casos, se observa que el estándar DVB-S2 puede aumentar la cantidad de información más del 60% comparado con DVB-S e ISDB-S.

- DVB-S e ISDB-S tienen un desempeño muy similar pero, los márgenes permiten asegurar una menor cantidad de errores en el caso de ISDB-S ($BER=10^{-11}$) que con DVB-S ($BER=10^{-7}$).
- La posibilidad de ajustar el factor de caída del filtro en el caso de DVB-S2 permite transportar una mayor cantidad de símbolos por Hertz disponible comparado a los esquemas de roll-off fijo a 0.35.

En el caso de análisis para sistemas de contribución con DVB-DSNG, DVB-S2 y la implementación TC8PSK del estándar ISDB-S, también se obtuvieron rendimientos de hasta 57% en volumen de datos transmitidos con DVB-S2 comparado con DVB-DSNG e ISDB-S. Esto utilizando umbrales de C/N similares.

Para fines prácticos, ya sea que la limitante del canal sea la potencia o el ancho de banda, el estándar DVB-S2 balanceado correctamente tiene un desempeño en promedio 30% mejor que su antecesor DVB-S. Si a este mejor desempeño se le suma una mejor eficiencia de codificación a través del uso del estándar MPEG-4, se puede transportar hasta el doble de información con las especificaciones más recientes.

En el caso de la comparativa entre ISDB-S y los estándares DVB se puede mencionar que aunque el primero incorpora mayores herramientas en la adaptación al canal que DVB-S, no supera al estándar DVB-S2. La fortaleza de DVB-S2 radica en la robustez de su código de corrección de errores que en el caso de ISDB-S y DVB-S, es un mismo sistema con limitaciones ya evaluadas.

3.3.2 Evaluación de enlaces.

Tomando en cuenta que el estándar DVB-S2 es el que ofrece las mejores características en base a la primera etapa del análisis, ahora es importante conocer sus márgenes de desempeño en enlaces por satélite en las bandas de frecuencia Ku y Ka. Además, se han de tomar en cuenta los beneficios que se obtendrían agregando un demodulador/modulador a bordo del satélite que convirtiera a los transpondedores en elementos regenerativos de señal basada en el estándar DVB-S2.

Nota: Los siguientes cálculos de enlace están basados en parámetros similares a los reales y en satélites supuestos en una misma posición orbital como referencia. El cálculo de la atenuación por lluvia está realizado conforme a la recomendación UIT-R P.618-10

Ejemplo 3. Señal de televisión digital en satélite de servicio fijo con TP a saturación.

Mediante el siguiente ejemplo, se analizarán los márgenes de enlace para un enlace fijo Atlanta-México D.F. de una portadora a saturación en un transpondedor de 36MHz dentro de un satélite que cubre ambas regiones y tiene una disponibilidad de 99.8% en ambos sitios (figura 3.8).

Características de la red 1:

DATOS DE LA PORTADORA		
Estándar	DVB-S2	
Symbol Rate	30000 KBAud	
Modulación:	8PSK	
F.E.C.:	2/3	
Tasa De Datos	58071.0 Kbps	
Roll-off:	20 %	
Eb/No:	3.75 dB	
BER:	1E-7	
Ancho de Banda Requerido	36000.00 kHz	
Ancho de Banda Asignado:	36000.00 kHz	
DATOS DEL SATÉLITE		
Posición del satélite	116.80 °W	
Ancho de banda del Transpondedor:	36.00 MHz	
	Enlace Ascendente	Enlace Descendente
Banda de Operación:	14-14.5 GHz	11.7-12.2 GHz
Frecuencia Central del TP	14.04 GHz	11.74 GHz
Polaridad:	Vertical	Horizontal
DATOS DE ESTACION TERRENA		Receptor
Localidad	Atlanta, Georgia, E.U.	México D.F., México
Latitud:	33.75 °N	19.40 °N
Longitud:	84.38 °W	99.15 °W
Disponibilidad Ascendente.:	99.80 %	99.80 %
Disponibilidad Descendente.:	99.80 %	99.80 %
Diámetro de Antena:	7.00 m	0.9 M
Ganancia de Antena Tx:	58.0 dBi	40.2 dBi
Ganancia de Antena Rx:	56.5 dBi	38.7 dBi
Temperatura de la Antena Rx	30 K	30 K
Temperatura Total del Sistema:	190 K	152 K
Figura de Merito Satélite (G/T):	3.36 dB/K	3.88 dB/K
PIRE en saturación del Transpondedor:	51.02 dBW	50.58 dBW

Figura 3.8. Tabla de características de la red 1.

Evaluación del enlace 1:

ENLACE ASCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Azimut E/T Transmisora	228.82	228.82	228.82	228.82	°
Elevación E/T Transmisora	37.7	37.7	37.7	37.7	°
Disponibilidad	99.8	99.8	99.8	99.8	%
PIRE estación transmisora	80	80	80	80	dBW
Perdidas por Espacio Libre	206.98	206.98	206.98	206.98	dB
Perdidas misceláneas	1	1	1	1	dB
Margen de Lluvia	0	3.97	0	3.97	dB
Relación C/No Ascendente	103.98	100.01	103.98	100.01	dBHz
Relación C/N Ascendente	17.02	16.57	17.02	16.57	dB
ENLACE DESCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Azimut E/T Receptora	223.77	223.77	223.77	223.77	°
Elevación E/T Receptora	59.62	59.62	59.62	59.62	°
Disponibilidad	99.8	99.8	99.8	99.8	%
P.I.R.E. en saturación Transpondedor	205.1	205.1	205.1	205.1	dBW
Perdidas por Espacio Libre	50.58	46.61	50.58	46.61	dB
Perdidas misceláneas	1	1	1	1	dB
Margen de Lluvia	0	0	1.83	1.83	dB
G/T de la E/T Receptora	16.88	16.88	15.17	15.17	dB/K
Relación C/No Descendente	89.96	86	86.43	82.46	dBHz
Relación C/N Descendente	14.2	10.35	10.77	6.86	dB
MARGEN DE ENLACE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Relación C/N Total del Sistema	12.38	9.42	9.85	6.42	dB
Relación C/N Requerida	5.83	5.83	5.83	5.83	dB
MARGEN DEL ENLACE:	6.55	3.60	4.02	0.59	dB

Figura 3.9. Tabla de resultados, evaluación del enlace de la red 1.

Observamos en la tabla de resultados de la figura 3.9 que los márgenes de enlace para la disponibilidad del 99.8% en banda Ku con la red propuesta se cumplen en todos los casos para las localidades de transmisión y de recepción planteadas con los parámetros asignados inicialmente.

Para este caso no es muy práctico disminuir el diámetro de las antenas de recepción. En caso de que estos se redujeran a 0.7m y no se variara algún otro parámetro se obtienen como resultados márgenes negativos para el supuesto de lluvia en ambos lados del enlace.

En el caso de servicio fijo por satélite, se busca la mayor disponibilidad del enlace sin importar las condiciones climáticas, es por eso que pretender disminuir las dimensiones de las antenas no es un factor muy significativo.

Con esta disponibilidad hay un estimado de que el enlace pueda estar inactivo unas 35 horas al año.

Ejemplo 4. Señal de televisión digital en satélite de servicio broadcast

Mediante el siguiente ejemplo, se analizarán los márgenes de enlace para un enlace de Broadcast Atlanta-México D.F. de una portadora a saturación en un transpondedor de 36MHz dentro de un satélite que cubre ambas regiones y tiene una disponibilidad de 99.7% en ambos sitios (figura 3.10).

Características de la red 2:

DATOS DE LA PORTADORA				
Estándar	DVB-S2			
Symbol Rate	30000 KBAud			
Modulación:	8PSK			
F.E.C.:	2/3			
Tasa De Datos	58071.0 Kbps			
Roll-off:	20 %			
Eb/No:	3.75 dB			
BER:	1E-7			
Ancho de Banda Requerido	36000.00 kHz			
Ancho de Banda Asignado:	36000.00 kHz			
DATOS DEL SATÉLITE				
Posición del satélite	116.80 °W			
Ancho de banda del Transpondedor:	36.00 MHz			
	Enlace Ascendente		Enlace Descendente	
Banda de Operación:	17.8-18.3 GHz	12.2-12.7 GHz		
Frecuencia Central del TP	17.84 GHz	12.24 GHz		
Polaridad:	LHCP	RHCP		
DATOS DE ESTACION TERRENA		Transmisor		Receptor
Localidad	Atlanta, Georgia, E.U.		México D.F., México	
Latitud:	33.75 °N	19.40 °N		
Longitud:	84.38 °W	99.15 °W		
Disponibilidad Ascendente.:	99.70 %	99.70 %		
Disponibilidad Descendente.:	99.70 %	99.70 %		
Diámetro de Antena:	7.00 m	0.7 m		
Ganancia de Antena Tx:	60.12 dBi	40.12 dBi		
Ganancia de Antena Rx:	56.85 dBi	36.85 dBi		
Temperatura Total del Sistema:	190 K	152 K		
Figura de Merito Satélite (G/T):	3.36 dB/K	3.88 dB/K		
PIRE en saturación del Transpondedor:	51.02 dBW	50.58 dBW		

Figura 3.10. Tabla de características de la red 2.

Evaluación del enlace 2:

ENLACE ASCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Azimut E/T Transmisora	228.82	228.82	228.82	228.82	°
Elevación E/T Transmisora	37.7	37.7	37.7	37.7	°
Disponibilidad	99.7	99.7	99.7	99.7	%
PIRE estación transmisora	80	80	80	80	dBW
Perdidas por Espacio Libre	209.06	209.06	209.06	209.06	dB
Perdidas misceláneas	1	1	1	1	dB
Margen de Lluvia	0	5.6	0	5.6	dB
Relación C/No Ascendente	101.9	96.3	101.9	96.3	dBHz
Relación C/N Ascendente	26.33	20.74	26.33	20.74	dB
ENLACE DESCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Azimut E/T Receptora	223.77	223.77	223.77	223.77	°
Elevación E/T Receptora	59.62	59.62	59.62	59.62	°
Disponibilidad	99.7	99.7	99.7	99.7	%
Perdidas por Espacio Libre	205.46	205.46	205.46	205.46	dBW
P.I.R.E. en saturación Transpondedor	50.58	44.98	50.58	44.98	dB
Perdidas misceláneas	1	1	1	1	dB
Margen de Lluvia	0	0	1.55	1.55	dB
G/T de la E/T Receptora	15.03	15.03	13.51	13.51	dB/K
Relación C/No Descendente	87.75	82.15	84.68	79.09	dBHz
Relación C/N Descendente	12.19	6.59	9.12	3.52	dB
MARGEN DE ENLACE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Relación C/N Total del Sistema	12.03	6.43	9.04	3.44	dB
Relación C/N Requerida	5.83	5.83	5.83	5.83	dB
MARGEN DEL ENLACE:	6.2	0.6	3.21	-2.39	dB

Figura 3.11. Tabla de resultados, evaluación del enlace de la red 2.

Hay un gran número de factores que intervienen en el cálculo de un enlace. En las simulaciones hechas (figura 3.11) se observa que en un enlace por satélite para servicios de *broadcast* se requiere mayor potencia en los amplificadores del satélite para alcanzar márgenes similares a los enlaces para servicio fijo. Hay que tomar en cuenta que las frecuencias de los enlaces ascendentes y descendentes sufren de mayor atenuación por lo cual es muy importante el criterio de la potencia.

Al ser satélites de mayor potencia que los de servicio fijo, en la recepción de las señales de *broadcast* se pueden evaluar antenas de menor diámetro a la recepción. De igual manera, se puede evaluar un enlace para una disponibilidad menor, pero esto en detrimento del servicio ofrecido a los suscriptores. Para los valores de disponibilidad supuestos, el estimado anual de horas en que el servicio estará caído es 52.5. A medida que la frecuencia aumenta, es evidente

que es más complicado obtener márgenes positivos. Es por esto que se debe de sacrificar disponibilidad en algunos casos.

Ejemplo 5. Señal de televisión digital en satélite de servicio broadcast en banda Ka⁶

Mediante el siguiente ejemplo, se analizarán los márgenes de enlace para un enlace fijo Atlanta-México D.F. de una portadora a saturación en un transpondedor de 36MHz dentro de un satélite que cubre ambas regiones y tiene una disponibilidad de 99.0% en el año en ambos sitios (figura 3.12). En este caso, la atenuación de propagación puede reducir enormemente la disponibilidad del servicio y la fiabilidad del sistema.

Características de la red 3:

DATOS DE LA PORTADORA		
Estándar	DVB-S2	
Symbol Rate	30000 KBaud	
Modulación:	8PSK	
F.E.C.:	2/3	
Tasa De Datos	58071.0 kbps	
Roll-off:	20 %	
Eb/No:	3.75 dB	
BER:	1E-7	
Ancho de Banda Requerido	36000.00 kHz	
Ancho de Banda Asignado:	36000.00 kHz	
DATOS DEL SATÉLITE		
Posición del satélite	116.80 °W	
	Enlace Ascendente	Enlace Descendente
Banda de Operación:	29.5-30 GHz	19.7-20.2 GHz
Frecuencia Central del TP	29.7 GHz	19.9 GHz
Polaridad:	Horizontal	Vertical
DATOS DE ESTACION TERRENA	Transmisor	Receptor
Localidad	Atlanta, Georgia, E.U.	México D.F., México
Latitud:	33.75 °N	19.40 °N
Longitud:	84.38 °W	99.15 °W
Disponibilidad Ascendente.:	99.00 %	99.00 %
Disponibilidad Descendente.:	99.00 %	99.00 %
Diámetro de Antena:	7.00 m	0.70 m
Ganancia de Antena Tx:	64.55 dBi	44.55 dBi
Ganancia de Antena Rx:	61.07 dBi	41.07 dBi
Temperatura Total del Sistema:	350 K	300 K
Figura de Merito Satélite (G/T):	16.0 dB/K	16.0 dB/K
PIRE en saturación del Transpondedor:	54 dBW	54 dBW

Figura 3.12. Tabla de características de la red 3.

⁶ Descartando ambiente de interferencia por inducciones entres satélites adyacentes, polarización contraria e intermodulación.

Evaluación del enlace 3:

ENLACE ASCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Azimut E/T Transmisora	228.82	228.82	228.82	228.82	°
Elevación E/T Transmisora	37.7	37.7	37.7	37.7	°
Disponibilidad	99	99	99	99	%
PIRE estación transmisora	80	80	80	80	dBW
Perdidas por Espacio Libre	213.49	213.49	213.49	213.49	dB
Perdidas misceláneas	1	1	1	1	dB
Margen de Lluvia	0	5.57	0	5.57	dB
Relación C/No Ascendente	110.11	104.53	110.11	104.53	dBHz
Relación C/N Ascendente	34.55	28.97	34.55	28.97	dB
ENLACE DESCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Azimut E/T Receptora	223.77	223.77	223.77	223.77	°
Elevación E/T Receptora	59.62	59.62	59.62	59.62	°
Disponibilidad	99.0	99.0	99.0	99.0	%
Perdidas por Espacio Libre	209.68	209.68	209.68	209.68	dBW
P.I.R.E. en saturación Transpondedor	54	48.43	54	48.43	dB
Perdidas misceláneas	1	1	1	1	dB
Margen de Lluvia	0	0	1.6	1.6	dB
G/T de la E/T Receptora	16.6	16.6	17.44	17.44	dB/K
Relación C/No Descendente	88.52	82.94	87.76	82.18	dBHz
Relación C/N Descendente	12.95	7.38	12.2	6.62	dB
MARGEN DE ENLACE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Relación C/N Total del Sistema	12.92	7.35	12.17	6.6	dB
Relación C/N Requerida	5.83	5.83	5.83	5.83	dB
MARGEN DEL ENLACE:	7.1	1.52	6.34	0.77	dB

Figura 3.13. Tabla de resultados, evaluación del enlace de la red 3.

Al evaluar enlaces en banda Ka para televisión es cuando se aprecia en la figura 3.13 la gran importancia de algunos parámetros tanto en el segmento espacial como en el satelital. La atenuación que se llega a sufrir en esta banda debe de ser contrarrestada con varios elementos dentro del enlace.

En la recomendación de la UIT BO.1659 se proponen algunos métodos de reducción del efecto de la atenuación en banda Ka y superiores. El primer método se basa en el aumento de la PIRE de manera variable o local. El segundo caso se basa en un modelo de transmisión jerárquica de la información. Por último, se plantea un modelo con sistema de almacenamiento en la recepción.

El hecho de usar haces concentrados o puntuales en áreas menores se vuelve el factor primordial en el primero de los casos descrito. De lo contrario, sería muy difícil construir equipamiento que fuera capaz de establecer un enlace.

Tomando en cuenta lo ya dicho acerca de la disponibilidad, en un enlace con estas características hay un aproximado de 174 horas (7.2 días) en el año que el servicio no se lograría. Debido a esto, los servicios en banda Ka tienden a ser configuraciones en que es tolerable la pérdida o falta de información por intervalos mayores de tiempo comparando con otras bandas. La alternativa de un enlace regenerativo trae consigo importantes mejoras en la disponibilidad y márgenes del enlace.

Ejemplo 6. Señal de televisión digital en satélite de servicio broadcast con transpondedor regenerativo en banda Ka (figura 3.14).

Características de la red 4:

DATOS DE LA PORTADORA			
Estándar	DVB-S2		
Symbol Rate	30000 KBaud		
Modulación:	8PSK		
F.E.C.:	2/3		
Tasa De Datos	58071.0 Kbps		
Roll-off:	20 %		
Eb/No:	3.75 dB		
BER:	2E-7		
Ancho de Banda Requerido	36000.00 kHz		
Ancho de Banda Asignado:	36000.00 kHz		
DATOS DEL SATÉLITE			
Posición del satélite	116.80 °W		
	Enlace Ascendente	Enlace Descendente	
Banda de Operación:	29.5-30 GHz	19.7-20.2 GHz	
Frecuencia Central del TP	29.7 GHz	19.9 GHz	
Polaridad:	Horizontal	Vertical	
DATOS DE ESTACION TERRENA	Transmisor	Receptor	
Localidad	Atlanta, Georgia, E.U.	México D.F., México	
Latitud:	33.75 °N	19.40 °N	
Longitud:	84.38 °W	99.15 °W	
Disponibilidad Ascendente.:	99.00 %	99.00 %	
Disponibilidad Descendente.:	99.00 %	99.00 %	
Diámetro de Antena:	7.00 m	0.60 m	
Ganancia de Antena Tx:	64.55 dBi	43.21 dBi	
Ganancia de Antena Rx:	61.07 dBi	39.73 dBi	
Temperatura Total del Sistema:	350 K	300 K	
Figura de Merito Satélite (G/T):	16.0 dB/K	16.0 dB/K	
PIRE en saturación del Transpondedor:	54 dBW	54 dBW	

Figura 3.14. Tabla de características de la red 3.

Evaluación del enlace 4:

ENLACE ASCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Azimut E/T Transmisora	228.82	228.82	228.82	228.82	°
Elevación E/T Transmisora	37.7	37.7	37.7	37.7	°
Disponibilidad	99.7	99.7	99.7	99.7	%
PIRE estación transmisora	75	75	75	75	dBW
Perdidas por Espacio Libre	213.49	213.49	213.49	213.49	dB
Perdidas misceláneas	1	1	1	1	dB
Margen de Lluvia	0	14.69	0	14.69	dB
Relación C/No Ascendente	101.11	86.42	101.11	86.42	dBHz
Relación C/N Ascendente	25.55	10.85	25.55	10.85	dB
ENLACE DESCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Azimut E/T Receptora	223.77	223.77	223.77	223.77	°
Elevación E/T Receptora	59.62	59.62	59.62	59.62	°
Disponibilidad	99.7	99.7	99.7	99.7	%
Perdidas por Espacio Libre	209.68	209.68	209.68	209.68	dBW
P.I.R.E. en saturación Transpondedor	54	54	54	54	dB
Perdidas misceláneas	1	1	1	1	dB
Margen de Lluvia	0	0	4.98	4.98	dB
G/T de la E/T Receptora	15.26	15.26	14.87	14.87	dB/K
Relación C/No Descendente	87.18	87.18	81.81	81.81	dBHz
Relación C/N Descendente	11.61	11.61	6.24	6.24	dB
MARGEN DE ENLACE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Relación C/N Requerida	5.83	5.83	5.83	5.83	dB
Margen Del Enlace Ascendente	19.72	5.03	19.72	5.03	dB
Margen Del Enlace Descendente	5.79	5.79	0.42	0.42	dB

Figura 3.15. Tabla de resultados, evaluación del enlace de la red 3.

Tomando las mismas características del ejemplo número 4, se observa que el uso de un transpondedor regenerativo en banda Ka permite obtener márgenes positivos con menores recursos en la transmisión de Tierra y mayor disponibilidad (figura 3.15). El enlace va a funcionar siempre y cuando los niveles de C/N en cada trayectoria sean los mínimos que aseguren el E_b/N_0 de 3.75 dB a la recepción. Hay que tomar en cuenta que no obstante los márgenes positivos, se agrega complejidad al diseño del satélite y, por otro lado la tasa de errores se puede llegar a duplicar en sistemas mal balanceados.

En la banda Ka se tienen ganancias de las antenas mayores en razón de 3dB con respecto a la banda Ku. Sin embargo, la ganancia obtenida es contrarrestada con los efectos diversos de atenuación que son mucho más extremos para esta banda. En el ejemplo mostrado, se observa que en Atlanta la atenuación por efecto de la lluvia en banda Ka (29.7GHz) para una disponibilidad del 99.7% es de 14.69 dB, este valor de atenuación es 8 veces mayor a la presente en la misma localidad a 17 GHz (5.6dB). Para el enlace descendente la atenuación en banda Ka resultó 2 veces mayor a la de Ku. Con todo y que la atenuación es mayor, es importante hacer notar que con la disponibilidad considerada, el tiempo en que el enlace estaría fuera se reduciría más de 120 horas en comparación con un transpondedor transparente en similares condiciones. Esto es que el enlace estaría fuera unas 52 horas en total a lo largo del año.

Suponiendo un diseño de sistemas de satélites convencionales, la PIRE se determina teniendo en cuenta los requisitos del margen del enlace para alcanzar los objetivos de disponibilidad. La PIRE necesaria podría ser demasiado grande para que el sistema de satélites fuera factible. Dadas las condiciones de propagación, puede que sea necesario aplicar las adecuadas técnicas de reducción de la atenuación debida a la lluvia para poner en funcionamiento sistemas factibles en las bandas de frecuencias más elevadas [34].

A manera de conclusiones generales, hemos observado el conjunto de elementos que tienen que considerarse para evaluar el funcionamiento de un sistema de comunicaciones por satélite de radiodifusión de TV. Una vez analizados los parámetros que entran en juego para calcular el enlace satelital, asimismo es necesario conocer los parámetros de los estándares de televisión, los cuales nos permiten definir niveles de calidad y umbrales de adecuado funcionamiento de los sistemas receptores.

El estándar DVB-S2 es, hoy por hoy el conjunto de protocolos de transporte más idóneo para el flujo de programas de televisión por satélite. A través de este estándar se pueden transmitir datos con video y audio de alta calidad. El uso de tramas especiales y modulaciones variables también permite priorizar algunos datos y hace factible el transporte de datos codificados con diversos estándares o de diferente naturaleza.

En la parte del segmento satelital, la realización de simulaciones y cálculos de enlace permite conocer los parámetros necesarios de la señales para que la comunicación se pueda llevar a cabo. Evaluando la afectación de la lluvia y las pérdidas por propagación de las ondas en el espacio libre se observaron las dificultades que enfrentan los analistas de redes satelitales para balancear enlaces de banda Ka. Hay que tomar en cuenta, además los siguientes factores para el uso de la banda Ka:

- Las antenas de los satélites ofrecen mayores ganancias y patrones de radiación más estrechos.
- El uso de haces puntuales permite un mejor reúso de frecuencias pero requiere un mejor alineamiento de las antenas.

- Las líneas de transmisión son de dimensiones más críticas. La pérdida es mayor en estos componentes y su fragilidad también.
- Los elementos activos tienen un desempeño más pobre a nivel de RF que a frecuencias menores (potencia de salida, eficiencia, control de características, etc.).

Los sistemas satelitales más novedosos utilizan la banda de frecuencias Ka para servicio fijo. El uso de la banda Ka implica fenómenos de propagación más intensos, el desarrollo de nuevas tecnologías y de nuevas interfaces aéreas basadas en codificaciones y modulaciones adaptivas.

Considerando lo último tanto en el diseño de la carga útil del satélite como en el diseño de las estaciones terrenas, la posibilidad de implementar enlaces en banda Ka se ha convertido una realidad y ha ido penetrando al mercado gracias a las apuestas de los grandes controladores satelitales como SES, Intelsat, Eutelsat, Telesat, entre otros.